

## НАПРЯЖЕНИЯ В КРУПНЫХ ЛИСТОВЫХ СЛИТКАХ ХОЛОДНОЙ САДКИ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ КОЛОДЦЫ

*На поверхности слитка после извлечения его из изложницы и охлаждения на воздухе образуется неоднородное поле напряжений с противоположными знаками. Сферическая донная часть слитка имеет напряжения растяжения, грани — преимущественно напряжения сжатия. Знаки напряжений по высоте слитков изменяются с плюса на минус вблизи разъема между изложницей и фигурным поддоном. Максимальные сжимающие напряжения образуются на уровне двух третей высоты слитка.*

Оптимизация формы крупного стального слитка остается важной задачей металлургического производства. Форма слитка и технология его отливки должны обеспечивать равномерное распределение в нем напряжений. Величина напряжений не должна также превышать определенных критических значений, при которых возникают трещины различного типа. Для оценки напряжений в слитках используются аналитические [1] и экспериментальные [2] методы исследования, среди последних важное место занимают фотоупругое моделирование динамики изменения напряжений под нагрузкой на прозрачных анизотропных моделях, рентгенографический способ измерения напряжений на образцах, вырезанных из стальных отливок, имеющих боковую конфигурацию профиля слитка. Из других разрушающих методов измерения напряжений не получили применения для слитков способ вырезания столбиков и классический метод сострагивания слоев. Магнитный метод [3], использующийся для измерения напряжений на поверхности изложниц, для слитков тоже не применяли. По названным методам измерения напряжений имеется достаточная литература, в которой встречаются противоречивые сведения, особенно относительно величины остаточных напряжений. Одной из причин этих противоречий является различие конкретных условий, при которых получены данные. К сожалению, в литературе еще недостаточно данных по

Таблица 1—Параметры изложницы и слитка

Параметры	Характеристика
Масса слитка (С), т	27,0
Масса изложницы (И), т	22,128
Внутренние размеры, мм:	
внизу	1700X980
вверху	1580X790
Высота изложницы, мм	2400
Глубина поддона, мм	310
Высота слитка, мм	2710
Толщина стенки (И), мм:	
внизу	205/215*)
вверху	195/205
Отношение И/С	0,82

\*) Числитель—по узкой грани, знаменатель—по широкой.

охладения прибыли слитка. Донная сферическая часть слитка высотой 310 мм образуется

распределению напряжений в слитках холодной садки в нагревательные колодцы.

Задачей исследования является оценка магнитным методом напряженного состояния крупного слитка, охлажденного после затвердевания стали на воздухе. Аналогов подобной работы в литературе не имеется.

В табл.1 приведены характеристики изложницы и отлитого в ней исследованного слитка. Изложницы С-276 отлиты на Карагандинском металлургическом комбинате из чугуна первой плавки, их испытывали и применяли на металлургическом комбинате им. Ильича для отливки слитков стали массой 27т. В верхней части изложницы устанавливаются теплоизоляционные вкладыши высотой 500 мм для уменьшения скорости

\* ПГТУ, канд. техн. наук, доцент

фигурным поддоном. Внутренняя поверхность узких и верхняя часть широких граней изложницы под установку теплоизоляционного вкладыша—плоские; широкие грани имеют волны с шагом 150 мм протяженностью 1900 мм по высоте от сферического дна слитка. Внутренние радиусы сопряжения граней изложницы составляют 70 мм. На наружной поверхности изложницы имеются упрочняющие торцевые пояса: внизу размером 30X350 мм, вверху—30X300 мм, которые по периметру дополнительно имеют плавно переходящий уклон к стенкам шириной 200 мм. По высоте середины широких граней снаружи сделаны на стенках изложницы утолщения размером 50X600 мм, сопрягающиеся с двух сторон радиусами 200 мм с нижним поясом. Эти ребра жесткости на верхнем участке длиной 900 мм постепенно утоньшаются и соединяются с верхним упрочняющим поясом. Приливы для транспортировки изложницы находятся только в верхней ее части и расположены на узких гранях.

Для замера напряжений применили малогабаритный прибор [3—5] с магнитоупругим датчиком, позволяющим измерять напряжения на литой необработанной поверхности. Тарирование прибора произвели на образцах размерами 20X90X400 мм из стали 16ГС, 3сп и 08кп при одноосном растяжении—сжатии на установке балочного типа. Для этого из исследуемых слитков вырезали вначале темплеты. Механической обработкой темплеты затем доводили до указанных размеров, при этом оставляя литую наружную поверхность без механической обработки. Магнитоупругий датчик во время тарирования крепили к литой поверхности образца и для каждой нагрузки, развиваемой прессом, подсчитывали напряжения. Средняя погрешность измерения, обусловленная шероховатостью литой поверхности образца, составляла не более 0,5 % измеряемой величины.

На рис.1 представлены усредненные градуировочные кривые показания прибора в мка ( $1 \cdot 10^{-6}$  а) от величины напряжений в МПа.

Полученные градуировочные кривые для Ст.16ГС (1), Ст.3сп (2) и Ст.08кп (3) расположены одна над другой.

Сначала с повышением нагрузки показания прибора увеличиваются незначительно:

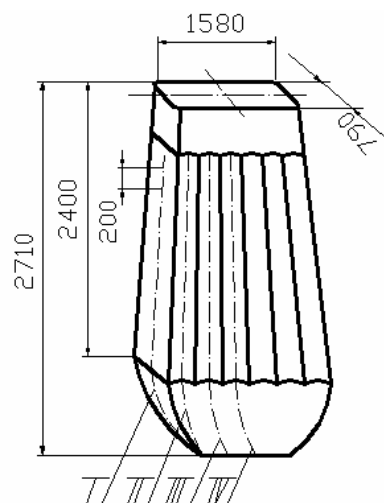


Рис.2—Линии измерения напряжений в слитке

градуировочные кривые до

напряжения 100 МПа несколько прогнуты к оси абсцисс и мало отличаются друг от друга. Дальнейший рост нагрузки сопровождается почти линейной зависимостью между показаниями индикатора магнитной анизотропии и численными значениями напряжения. При больших нагрузках нарушается линейность градуировочной кривой.

Напряженное состояние слитков из сталей 16ГС, 3сп и 08кп изучали после извлечения их из изложниц и охлаждения на воздухе до температуры окружающей среды. Продолжительность выдержки слитков в изложницах составляла 3 ч. Напряжения измеряли по периметру на четырех линиях по высоте слитка (Рис.2): посередине узкой (I) и широкой (IV) граней, в углу (II) и между углом и серединой широкой грани (III). На каждой линии проводили измерения в 18-и различных точках: в сферической части слитка в 8-и различных местах с интервалом 30 мм по высоте, на гранях слитка с интервалом 200 мм в 10-и участках по высоте.

На широкой грани слитка измерения проводили в углублениях волн. Перед измерением напряжений на поверхность слитка наносили координатную сетку, что позволило точно

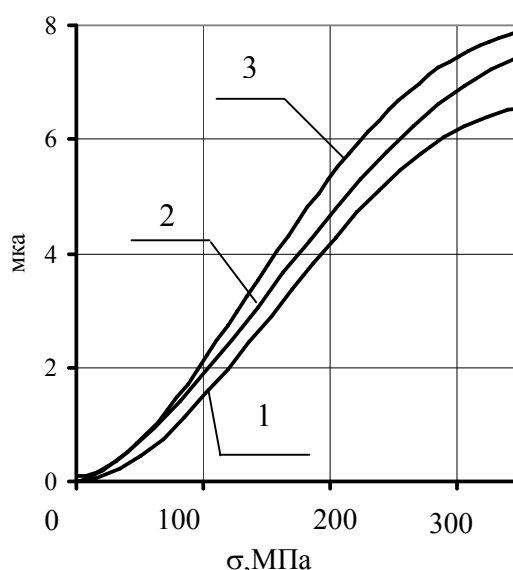


Рис.1—Градуировочные кривые образцов стали: 1—16ГС; 2—3сп; 3—08кп

фиксировать положение датчика при повторных измерениях. В прибыльной части слитка напряжения не измеряли.

Для анализа результатов исследования напряженного состояния слитка вычисляли среднеарифметические напряжения  $\sigma_{n1}$ , среднеквадратические отклонения  $S$  и среднеквадратические напряжения  $\sigma_{n2}$ . Всего исследовано 5 слитков из различных марок сталей, на которых выполнено 360 измерений, не считая повторных.

Напряжения в слитках холодной садки начинают формироваться с момента начала кристаллизации стали. Силовое взаимодействие затвердевающего в изложнице слитка обуславливается внутренними и внешними силами. Внутренние силы появляются в результате неравномерного температурного поля и одновременного протекания фазовых превращений в объеме слитка. Эти силы приводят к образованию так называемых температурных напряжений. Внешние силы вначале определяются ферростатическим давлением и поверхностным трением, а затем затрудненной усадкой, из-за образования заливов в кюмпельной части слитка, его приваривания к поддону и наличия волн в изложнице. Кроме того, по мере прогрева изложницы, в результате релаксации ранее возникших в ней литейных и эксплуатационных напряжений, стенки ее посередине граней термоупруго деформируются внутрь полости, вызывая в слитке дополнительные напряжения. Динамика изменения в стенках изложницы напряжений показана на рис.3.

При термическом ударе знаки напряжений в изложнице С-276 на середине узкой и широкой граней меняются несколько раз с минуса на плюс и обратно. Первый раз смена знака напряжения происходит через 10 минут после заливки стали в

изложницу, когда тонкая корочка затвердевшей стали еще плотно прижата к ее внутренней ее поверхности ферростатическим давлением.

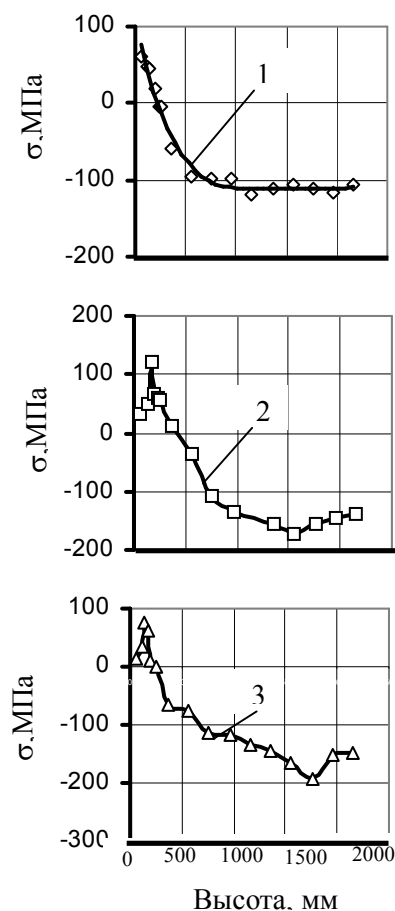


Рис.4—Напряжения в слитках: 1-08кп; 2-3сп; 3-16ГС

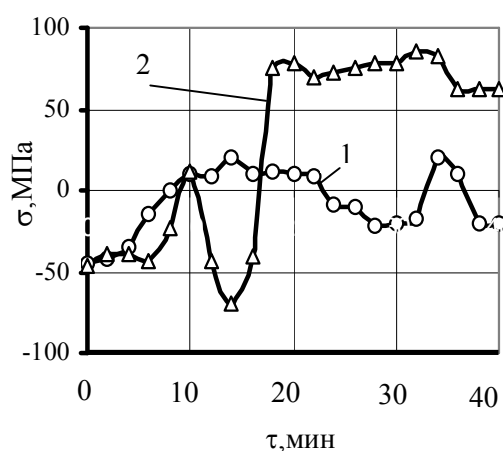


Рис.3—Напряжения на узкой (1) и широкой (2) гранях

При смене знаков напряжений величина деформаций стенок изложницы изменяется от 0,3 до 1,5 мм. В дальнейшем после стрипперования слитка из изложницы в нем продолжают развиваться с более высокой скоростью термические напряжения. Условия охлаждения различных частей слитка на воздухе в этот период тоже неодинаковы, вследствие земного теплового экрана и существующих окружающих воздушных потоков—сквозняков. На рис.4 представлено изменение среднеарифметических напряжений по высоте слитков стали 08кп (1), 3сп (2), 16ГС (3).

Характерной особенностью распределения напряжений по высоте является изменение их знаков при переходе кюмпельной сферической части в тело слитка. При этом во всех трех слитках в донной части обнаруживаются напряжения растяжения, а на гранях слитка—напряжения сжатия. Из полученных зависимостей также следует, что величина напряжений зависит от упругопластических свойств сталей.

Наиболее высокие среднеквадратические напряжения  $\sigma_{n2}$  в слитке из стали 16ГС—147,3 МПа, низкие—97,6 МПа в слитке стали 08кп. Среднеарифметические напряжения  $\sigma_{n1}$  сжимающего характера на гранях слитков изменяются от

Таблица 2—Напряжения по высоте слитков

Марка	Измерения	$\sigma = \sigma_{n1} \pm S$ , МПа	$\sigma_{n2}$ , МПа
16ГС	грани	-135,7±44,5	142,8
	сфера	33,0±148,2	151,8
	слиток	-54,2±136,9	147,3
Зсп	грани	-109,9±90,4	142,3
	сфера	57,1±86,3	103,5
	слиток	-38,3±121,2	127,1
08кп	грани	-107,7±38,1	107,7
	сфера	23,3±74,7	80,2
	слиток	-51,1±83,2	97,6

состояния слитка в соответствии со схемой, приведенной на рис.1, обобщили результаты измерения напряжений пяти слитков С-276.

На рис.5 сопоставляются среднеарифметические напряжения в слитке вдоль узкой (I) и широкой (IV) граней, угла (II) и между углом и серединой широкой грани (III). Напряжения в слитке переменны по высоте и периметру. Общим для всех линий измерения является то, что знаки напряжений в слитке изменяются с плюса на минус вблизи разъема между изложницей и поддоном.

Сферическая часть слитка термоупруго растянута, грани-сжаты. При этом смена знака напряжений на широкой грани слитка происходит несколько выше разъема формы. Необходимо также отметить, что в углу сферы слитка в донной части сохраняются напряжения сжатия.

Обследование слитков показало, что вблизи разъема на сфере слитка имеются трещины горячего типа. Эти трещины являются следствием затрудненной усадки затвердевшей корочки стали и преждевременного отрыва ее от поверхности с образованием зазора между изложницей и слитком.

Отрыв корочки стали с образованием зазора происходит тем позже, чем больше ферростатическое давление  $P$  и радиус  $r$  кривизны внутренней поверхности изложницы.

$$Pr < \sigma \xi$$

Правая часть неравенства зависит от толщины корки  $\xi$  и ее прочности  $\sigma$ , поэтому в начальные моменты формирования слитка отрыв невозможен, так как толщина корки и ее прочностные свойства малы.

Прежде всего зазор образуется на поверхности с малым радиусом кривизны, затем происходит отрыв поверхностей с большим радиусом и только потом от плоских участков изложницы. В боковой сферической части слитка наблюдается

–107,7 до –135,7 МПа (табл.2). Таким образом, чем больше прочностные характеристики стали, тем выше напряжения в слитках.

Сферическая часть слитков, образованная фигурным поддоном, находится под воздействием растягивающих напряжений. Аналогичная закономерность в распределении напряжений наблюдается по высоте крупного слитка УВС-23.

Представляет практический интерес построение эпюр напряженного состояния слитка по периметру и его высоте. Для построения зависимости напряженного

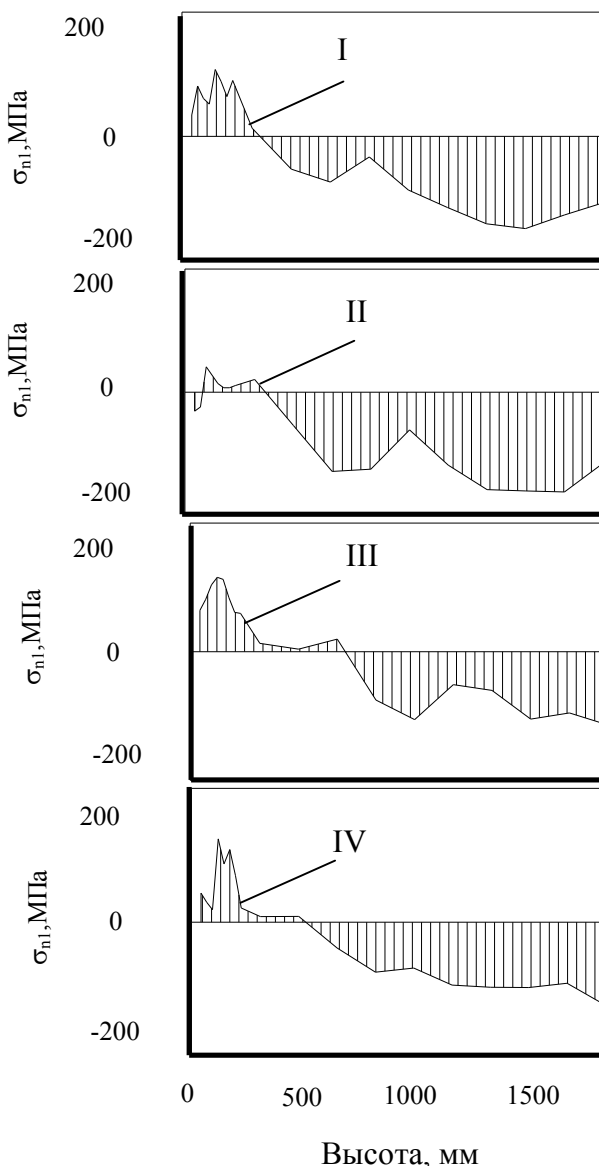


Рис.5—Напряжения в слитке: I—узкая грань; II—угол; III,IV—широкая грань

концентрация деформаций из-за затрудненной усадки затвердевшей корочки стали в продольном направлении. Поэтому участок сферы слитка имеет напряжения растяжения. Обобщенный по результатам исследования пяти слитков характер такой зависимости показан

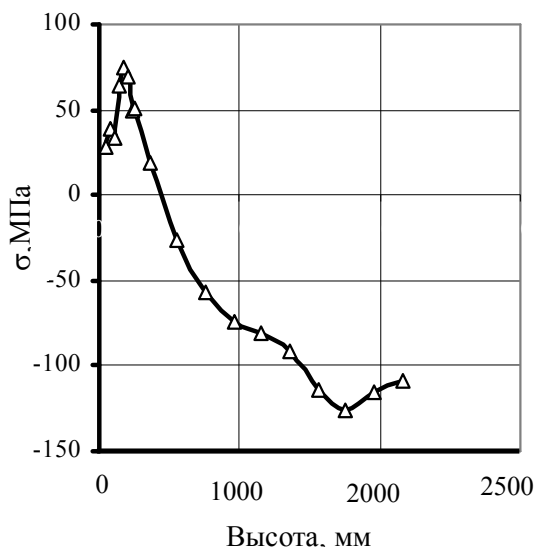


Рис.6—Напряжения по высоте слитка

на рис.6, на котором отчетливо видно распределение растягивающих и сжимающих напряжений по высоте слитка. Максимальные напряжения сжатия образуются на уровне двух третей высоты слитка. Минимальные напряжения располагаются на уровне разъема между изложницей и фигурным поддоном. Для более равномерного распределения напряжений по высоте слитка следует повысить точность сборки изложницы и поддона под заливку или изменить конфигурацию изложницы таким образом, чтобы основная часть сферы слитка располагалась в ней. Следует испытать изложницу с тонким дном и разъемом внизу по сфере. Дно в изложнице вблизи оси симметрии слитка не должно превышать 0,3-0,4 толщины стенки. Такая конструкция изложницы исключит потребность в установке шамотного стаканчика при разливке стали сифоном и упростит конфигурацию стального вкладыша при разливке стали сверху.

При этом поверхность поддона и нижний торец изложницы должны быть механически обработаны, чтобы исключить образование заливов на слитке и усилить тепловую аккумуляцию тепла.

#### Выводы

1. Найдены закономерности распределения напряжений на поверхности крупного листового слитка, охлажденного после затвердевания стали на воздухе.
2. Сферическая донная часть слитка, образованная при его литье фигурным поддоном, имеет преимущественно напряжения растяжения, грани слитка – напряжения сжатия. Знаки напряжений по высоте слитка изменяются с плюса на минус вблизи разъема между изложницей и поддоном.
3. Максимальные среднеарифметические напряжения сжатия величиной  $-126 \pm 77$  МПа образуются на уровне приблизительно двух третей высоты слитка.
4. Напряжения в слитках увеличиваются с повышением прочности стали.

#### Перечень ссылок

1. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование термоупругих напряжений в затвердевающем стальном слитке / Ф.В.Недопекин, В.В.Белюсов, А.Е.Солонько // Пром. теплотехника.—1988.—Т.10,№1.—С.48-52.
2. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали / В.А.Ефимов.- М.:Металлургия, 1976.—552 с.
3. Скребецов А.М. Снижение расхода изложниц на металлургических предприятиях / А.М. Скребецов, Л.А. Большаков, А.Г. Чоповский.—К.: Вища школа, 1987.—91 с.
4. Большаков Л.А. Экспериментальное исследование напряженного состояния изложниц / Л.А. Большаков, А.Г. Чоповский // Повышение стойкости изложниц.—М., 1972.—№2.—С.108-110.
5. Большаков Л.А. Термические напряжения в бандажированных изложницах / Л.А.Большаков // Вісник Приазовського державного технічного університету.— Мариуполь, 2002.— Вып. №12 — С.63-67.